# LES VITESSES RELATIVES DE LA LUMIÈRE

LÉON FOUCAULT

Dissertation Collection

QC
407
.F68
1853

Digitized by Google

PL
84.6
76111

PHILLIPS LIBRARY
OF
HARVARD COLLEGE OBSERVATORY

JOHN G. WOLBACH LIBRARY
HARVARD COLLEGE OBSERVATORY
60 GARDEN STREET
CAMBRIDGE, MASS. 02138

Digitized by Google

JOHN G. W...
HARVARD COLLEGE ...
60 GARDEN STREET
CAMBRIDGE, MASS. 02138

Digitized by Google

PL 64.85 C.C.
187




N° D'ORDRE
169.

# THÈSE

PRÉSENTÉE

## A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. LÉON FOUCAULT.

THÈSE DE PHYSIQUE. Sur les vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau.

— — Propositions de Chimie données par la Faculté.

**Soutenue le 25 avril 1853 devant la Commission d'examen.**

MM. DUMAS, *Président.*
DESPRETZ, BALARD, } *Examinateurs.*

PARIS,
BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
**de l'École Polytechnique et du Bureau des Longitudes,**
Quai des Augustins, 55.
1853.

Digitized by Google

Digitized by Google

76111

N° D'ORDRE
169.

# THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. LÉON FOUCAULT,

Soutenue le 25 avril 1853.

PARIS,
BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
de l'École Polytechnique et du Bureau des Longitudes,
Rue du Jardinet, 12.
1853.

Digitized by Google

Digitized by Google

N° D'ORDRE
169.

# THÈSE

PRÉSENTÉE

## A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

**PAR M. LÉON FOUCAULT.**

THÈSE DE PHYSIQUE. Sur les vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau.

— — Propositions de Chimie données par la Faculté.

**Soutenue le 25 avril 1853 devant la Commission d'examen.**

MM. DUMAS, *Président.*

DESPRETZ, } *Examinateurs.*
BALARD, }

**PARIS,**

BACHELIER, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

**de l'École Polytechnique et du Bureau des Longitudes,**

Rue du Jardinet, 12.

1853.

Digitized by Google

QC
407
.F68
1853

# ACADÉMIE DÉP$^{LE}$ DE LA SEINE.

## FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

| | | |
|---|---|---|
| Doyen | MILNE EDWARDS, Professeur.. | Zoologie, Anatomie, Physiologie. |
| Professeurs honoraires. | Le baron THENARD. | |
| | BIOT. | |
| | MIRBEL. | |
| | PONCELET. | |
| | AUG. DE SAINT-HILAIRE. | |
| Professeurs | CONSTANT PREVOST | Géologie. |
| | DUMAS | Chimie. |
| | DESPRETZ | Physique. |
| | STURM | Mécanique. |
| | DELAFOSSE | Minéralogie. |
| | BALARD | Chimie. |
| | LEFÉBURE DE FOURCY | Calcul différentiel et intégral. |
| | CHASLES | Géométrie supérieure. |
| | LE VERRIER | Astronomie physique. |
| | DUHAMEL | Algèbre supérieure. |
| | DE JUSSIEU | Physiologie végétale. |
| | GEOFFROY SAINT-HILAIRE. | Anatomie, Physiologie comparée, Zoologie. |
| | LAMÉ | Calcul des probabilités, Physique, Mathématique. |
| | DELAUNAY | Mécanique physique. |
| | PAYER | Organographie végétale. |
| | N. | Astronomie mathématique et Mécanique céleste. |
| | N. | Physique. |
| Agrégés | MASSON | Sciences physiques. |
| | PELIGOT | Sciences physiques. |
| | BERTRAND | Sciences mathématiques. |
| | J. VIEILLE | Sciences mathématiques. |
| | DUCHARTRE | Sciences naturelles. |
| Secrétaire | E.-P. REYNIER. | |

Digitized by Google

A

Monsieur Dumas,

Membre de l'Institut,

Témoignage d'admiration pour le Savant et pour le Professeur.

Léon Foucault.

Digitized by Google

# THÈSE DE PHYSIQUE.

SUR

## LES VITESSES RELATIVES DE LA LUMIÈRE DANS L'AIR ET DANS L'EAU.

### PRÉLIMINAIRES HISTORIQUES.

A l'époque où j'entrepris ce travail, la science possédait déjà trois méthodes différentes pour déterminer la vitesse de la lumière. L'astronomie a fourni les deux premières, fondées sur l'observation des éclipses des satellites de Jupiter, et sur le phénomène de l'aberration des étoiles. La troisième a été imaginée plus récemment par M. Fizeau, et rentre dans le domaine de la physique expérimentale. Sans atteindre au même degré de précision, ces diverses méthodes se contrôlent les unes les autres, de telle sorte qu'il ne peut plus subsister le moindre doute sur la véritable valeur de la vitesse de la lumière dans l'espace vide ou dans notre atmosphère. Quant aux vitesses que prend la lumière en pénétrant dans les milieux réfringents, elle n'était donnée que par le calcul, qui, interprétant la réfraction dans le système de l'émission ou dans le système des ondulations, donnait, selon l'hypothèse adoptée, des résultats bien différents. M. Arago, dès l'année 1838, fit le premier sentir l'importance d'une expérience qui, sans même conduire à la mesure exacte des vitesses de la lumière dans des milieux inégalement réfringents, mettrait seulement leur différence en évidence, et fixerait, par suite, les physiciens sur la manière d'interpréter la réfraction. La méthode expérimentale que je vais décrire dans ce Mémoire, offrant la possibilité de mesurer la vitesse



Digitized by Google

de la lumière dans un trajet très-court, permet d'opérer sur différents milieux, et donne la solution complète de l'importante question posée, il y a quinze ans, par M. Arago.

Mais, avant d'entrer en matière, il convient de jeter rapidement un coup d'œil sur l'ensemble des phénomènes naturels ou artificiellement produits, qui sont susceptibles de mettre en évidence la propagation successive des rayons lumineux.

En astronomie, les phénomènes se sont produits d'eux-mêmes; ils se sont d'abord montrés comme des anomalies; on ne les cherchait pas, on ne s'attendait pas à les rencontrer, on n'a eu qu'à les observer, et à les rapporter à leur véritable cause pour en déduire, par le calcul, le chiffre exprimant l'étonnante vitesse de la lumière. Ce résultat porte le caractère distinctif des œuvres de l'astronomie; il est empreint d'une haute précision, et l'on peut encore douter que les expériences faites à la surface de la Terre puissent prétendre un jour au même degré d'exactitude; jusqu'à présent, du moins, on n'a cherché qu'à contrôler approximativement par la physique les nombres fournis par les observatoires, et l'on s'estime heureux d'avoir obtenu des valeurs qui oscillent assez largement autour du chiffre véritable.

Le phénomène sensible qui dut révéler pour la première fois la vitesse de la lumière, se passe dans les limites de notre système planétaire; il a été observé et expliqué par Roëmer, dans le courant des années 1675 et 1676; il consiste, comme on sait, dans l'inégalité apparente des retours successifs des éclipses de satellites qui accompagnent Jupiter. Le premier de ces satellites surtout, à cause de son petit volume, de la rapidité de sa marche et de sa proximité de la planète, offre à l'observation le spectacle d'*immersions* dans l'ombre et d'*émersions* très-nettes et faciles à saisir. C'est un flambeau qui s'allume et qui s'éteint à des intervalles de temps réellement égaux, et que l'on observe à des distances variables. Entre l'opposition et la conjonction, la distance de la Terre à Jupiter augmente de toute la valeur du diamètre de l'orbite terrestre. Pendant cette période, les émersions seules sont visibles et semblent de plus en plus tardives, par rapport aux instants équidistants où elles devraient

Digitized by Google

paraître quand on les déduit du nombre d'éclipses qui arrivent pendant l'année entière. Entre la conjonction et l'opposition, la distance entre les deux planètes se réduit d'un diamètre de l'orbite terrestre, et pendant cette seconde période, on ne peut voir que les émersions, qui se précipitent de manière à rétablir une compensation exacte. La somme des retards pendant la période d'éloignement est égale à la somme des avances pendant la période de rapprochement, et chacune d'elles donne le temps qu'emploie la lumière à franchir le diamètre de notre propre orbite. Ce temps, mesuré directement aux instruments chronométriques, s'est trouvé égal à $16^{m}26^{s}$; ce qui donne, en tenant compte de l'espace parcouru par la lumière, une vitesse de 79572 lieues de 4000 mètres, par seconde.

Cinquante années plus tard, Bradley arriva au même résultat, par l'étude approfondie d'un mouvement annuel auquel participent toutes les étoiles, et qui est désigné, dans la science, sous le nom d'*aberration*. En vertu de l'aberration, toutes les étoiles semblent déplacées vers le point du ciel où aboutit la tangente menée à l'orbite terrestre par le point qu'occupe la Terre à un moment donné et dans le sens même de son mouvement de translation. Le plan perpendiculaire à cette ligne trace sur la sphère céleste un grand cercle qui passe par toutes les étoiles pour lesquelles le déplacement dû à l'aberration acquiert sa valeur maximum. Autrement dit, toutes les étoiles qui nous envoient leur lumière dans une direction perpendiculaire à celle de notre propre mouvement, nous apparaissent le plus déviées possible dans le sens de ce mouvement, et écartées de leur position vraie d'un arc de 20",3. Le grand cercle considéré, accomplissant dans le cours d'une année sa révolution complète autour du diamètre qui passe par les pôles de l'écliptique, il en résulte non-seulement que toutes les étoiles participent au phénomène de l'aberration, mais que pour chacune d'elles il acquiert deux fois par an sa valeur maximum.

Pour toutes les étoiles comprises dans le plan de l'écliptique, ce déplacement a lieu suivant un petit arc de grand cercle qui se confond avec une droite; pour les deux seules étoiles situées aux pôles

Digitized by Google

mêmes de l'écliptique, ce déplacement s'effectue sur le contour d'un cercle; enfin, pour toutes les étoiles occupant des positions intermédiaires, l'aberration engendre des ellipses graduellement variées et qui présentent toutes les formes comprises dans la même espèce de courbe entre la ligne droite et le cercle.

A ces caractères remarquables, Bradley reconnut que la cause de l'aberration n'est pas dans les étoiles elles-mêmes, mais qu'il faut la chercher dans un principe unique, dans le principe lumineux qui nous met en relation avec les corps célestes, et dont la vitesse de propagation, déjà connue, ne peut être considérée comme infiniment grande par rapport à la vitesse de la Terre entraînée dans l'espace par son mouvement de translation.

Les deux vitesses sont comme 10,200 est à 1; conséquemment, lorsqu'une lunette est dirigée vers une étoile située sur le cercle d'aberration maximum, elle est entraînée dans un sens perpendiculaire à la direction de son axe, par le mouvement de la Terre; et pendant le temps que la lumière emploie à franchir la distance du centre optique de l'objectif à son foyer, l'oculaire de l'instrument s'avance parallèlement au plan focal, de la dix-millième partie environ de cette distance; il en résulte pour l'observateur un déplacement relatif de l'image de l'étoile, qui semble avoir été laissée en arrière, tandis que l'étoile elle-même paraît nécessairement déviée en sens inverse; la grandeur de ce déplacement, rapportée à la longueur focale de la lunette, est précisément la mesure de l'aberration.

Si l'on admet l'explication que je viens de rappeler, la grandeur absolue de l'aberration exprime le rapport entre la vitesse de la lumière dans la lunette, et celle de la lunette elle-même participant au mouvement de la Terre; et, en effet, le chiffre obtenu par cette méthode s'accorde, à un deux-centième près, avec celui que donne l'observation des satellites de Jupiter. Ainsi envisagée, l'aberration donnerait la vitesse de la lumière, non dans le vide planétaire, mais dans l'étendue qu'occupent les instruments; elle rendrait sensible la durée du parcours des rayons lumineux franchissant la longueur si restreinte de nos lunettes, les espaces célestes ne concourant que

Digitized by Google

d'une manière indirecte au résultat final, pour offrir un point de mire placé à l'infini, et permettre le libre développement du mouvement de translation de la Terre.

Il ne m'appartient pas d'insister davantage sur ces glorieux travaux. Je n'ai voulu, en les rappelant, que les considérer au point de vue physique, et faire ressortir les conditions naturelles et indépendantes du concours de l'homme, qui ont fait naître, comme conséquence de la propagation successive de la lumière, des phénomènes sensibles et observables. Tout le mérite consistait à les saisir, à les mesurer avec précision et à les rapporter à leur véritable cause. Pour les physiciens, la tâche était plus étendue; ils avaient à imaginer et à réaliser, dans les espaces terrestres, un système d'expériences équivalant à celles que les astronomes ont trouvées toutes faites dans le ciel; aussi leur a-t-il fallu, avant de rien tenter, qu'ils fussent en possession du chiffre réel qu'ils cherchaient à contrôler.

Le premier physicien qui entreprit de mesurer la vitesse de propagation d'un agent impondérable à la surface de la Terre est M. Wheatstone; et, bien que ses expériences aient porté sur l'électricité et non sur la lumière, il est assuré de voir son nom attaché à la question résolue par l'emploi du miroir tournant. Cet instrument est, en effet, une des plus heureuses inventions de M. Wheatstone, et l'on n'en connaît pas d'aussi puissant pour évaluer de petites fractions de temps.

En 1835, M. Wheatstone cherchait à déterminer la durée de l'étincelle électrique, la durée de son parcours dans l'air, et la durée de la transmission de l'électricité à travers un fil conducteur, ou, ce qui revient au même, le temps qui s'écoule entre les explosions de deux étincelles jaillissant en deux points éloignés d'un même circuit. Après avoir vainement fait tourner autour d'un axe les organes excitateurs des étincelles, dans l'espérance d'accroître leur largeur et d'altérer leurs directions et leurs positions respectives, il a songé à communiquer le mouvement de rotation à un simple miroir plan établi à une certaine distance des appareils excitateurs et fixes. Le mi-

Digitized by Google

roir, en tournant autour d'une ligne passant par sa surface réfléchissante, donnait, de ces appareils, une image virtuelle qui cessait bientôt d'être distincte, à cause de la rapidité de son mouvement angulaire double de celui du miroir. Mais quand éclataient les étincelles, leur peu de durée fixait, dans le miroir, leurs images dont les apparences plus ou moins modifiées prenaient une signification facile à saisir. Si, par exemple, un long circuit excitateur destiné à décharger la bouteille de Leyde était interrompu en trois points, dans son milieu et près de chaque extrémité; si, d'ailleurs, il était replié de manière à ce que les trois interruptions fussent placées sur une même droite parallele à l'axe de rotation du miroir, au moment de la décharge, les trois étincelles vues directement apparaissaient en même temps sans que rien pùt faire soupçonner à l'observateur l'ordre dans lequel elles se succèdent réellement; mais, vues par réflexion dans le miroir tournant, le retard de l'étincelle moyenne et la simultanéité des étincelles extrêmes devenaient également manifestes, attendu que ces deux dernières se montraient encore sur une même verticale, tandis que l'étincelle moyenne, éclatant un peu plus tard, était déviée dans le sens de la rotation du miroir.

M. Wheatstone a déduit de ce genre d'expériences une valeur de la vitesse de l'électricité qui ne s'accorde pas avec les résultats de mesures plus récentes. Peut-être a-t-il été induit en erreur par des phénomènes accessoires qui compliquent le phénomène principal, mais qui sont indépendants du procédé optique qu'il a mis en usage. Si donc son travail offre encore matière à discussion, il ne semble pas que les objections puissent porter sur la propriété précieuse que possède le miroir tournant de séparer, par le déplacement angulaire de certaines images, les instants très-rapprochés qui correspondent aux apparitions de phénomènes instantanés. C'est donc à juste titre qu'à peine sorti des mains de l'inventeur, l'instrument de M. Wheatstone fut adopté par M. Arago, comme devant servir à juger par une épreuve décisive les deux théories qui se disputent l'explication des phénomènes lumineux. Tous les physiciens ont lu et relu la Note si intéressante dans laquelle le Secrétaire perpétuel de l'Académie

Digitized by Google

des Sciences a exposé et développé son magnifique projet, et j'imagine qu'en y réfléchissant profondément, ils ont dû arriver comme moi à cette conviction, que l'expérience conçue par M. Arago se tenait sur la limite des choses possibles, et qu'avant de réussir, elle aurait à subir quelque modification.

M. Arago se proposait d'opérer sur deux rayons partant simultanément de deux sources situées sur une même verticale, et tombant, l'un à travers l'air, l'autre à travers un liquide, sur un miroir tournant; la marche des deux rayons étant inégalement rapide à travers les milieux différents, le miroir tournant aurait eu pour fonction de rendre distincts les instants de leur arrivée à sa surface réfléchissante. Voici, au reste, en quels termes M. Arago a résumé lui-même ses idées :

« Deux points rayonnants placés l'un près de l'autre et sur la même verticale brillent instantanément en face d'un miroir tournant. Les rayons du point supérieur ne peuvent arriver à ce miroir qu'en traversant un tube rempli d'eau; les rayons du second point atteignent la surface réfléchissante sans avoir rencontré dans leur course aucun autre milieu que l'air. Pour fixer les idées, nous supposerons que le miroir, vu de la place que l'observateur occupe, tourne de droite à gauche. Eh bien! si la théorie de l'émission est vraie, si la lumière est une matière, le point le plus élevé *semblera à gauche* du point inférieur; *il paraîtra à sa droite*, au contraire, si la lumière résulte des vibrations d'un milieu éthéré.

» Au lieu de deux seuls points rayonnants isolés, supposons qu'on présente instantanément au miroir une ligne lumineuse verticale. L'image de la partie supérieure de cette ligne se formera par des rayons qui auront traversé l'eau; l'image de la partie inférieure résultera de rayons dont toute la course se sera opérée dans l'air. Sur le miroir tournant, l'image de la ligne unique semblera brisée; elle se composera de deux lignes lumineuses verticales, de deux lignes qui ne seront pas sur le prolongement l'une de l'autre.

» L'image rectiligne supérieure est-elle moins avancée que celle d'en bas? paraît-elle à sa gauche?

» *La lumière est un corps.*



Digitized by Google

» Le contraire a-t-il lieu? l'image supérieure se montre-t-elle à droite?

» *La lumière est une ondulation!* »

Réduite ainsi à sa plus simple expression, l'expérience de M. Arago est facile à concevoir; il semble qu'il n'y avait plus qu'à se mettre à l'œuvre; mais c'est en suivant la discussion des conditions matérielles auxquelles il faut satisfaire, que l'expérimentateur entrevoit des difficultés sérieuses.

Quelle vitesse de rotation faut-il communiquer au miroir? Quelle étendue d'air et d'eau convient-il de disposer sur le trajet des rayons pour que la lumière soit retardée ou accélérée dans sa marche à travers le milieu réfringent au point de donner, par réflexion, des images distinctes? Quelle source de lumière présentera la vivacité et l'instantanéité requises? Sur tous ces points, on trouve dans la Note de M. Arago les indications les plus précises.

En supposant qu'une déviation d'une demi-minute fût observable dans une lunette, une colonne d'eau de 14 mètres de longueur n'eût exigé, pour la produire, que mille tours du miroir par seconde. Mais, comme il fallait se ménager quelque latitude, comme des circonstances imprévues pouvaient dérouter les prévisions les plus réfléchies, M. Arago s'était réservé d'agrandir au besoin le phénomène par la multiplication des miroirs tournant alternativement en des sens différents, et destinés à se renvoyer successivement l'un à l'autre les deux faisceaux dont la divergence eût augmenté à chaque réflexion, et proportionnellement au nombre des miroirs. Il indiquait aussi, comme ressource précieuse, d'employer, au lieu d'eau, un milieu plus réfringent, le sulfure de carbone, qui n'est pas moins transparent.

En portant à quatre le nombre des miroirs, en ne cherchant que des déviations d'une demi-minute, et en laissant l'eau pour le sulfure de carbone, la longueur nécessaire du tube destiné à le contenir se réduisait finalement à $2^{m},2$.

Il est évident que le nombre des miroirs et le nombre des tours, leur distance à la source, la différence des indices de réfraction des

Digitized by Google

deux milieux traversés, et la grandeur de la déviation relative, sont autant de quantités assujetties à une dépendance mutuelle et faciles à enchaîner dans une même formule. On peut, sur le papier, les faire varier d'une manière arbitraire entre certaines limites, mais c'était au tâtonnement à désigner les valeurs les plus favorables à l'observation.

La pièce la plus importante et la plus nouvelle de cet appareil était la machine qui devait communiquer aux miroirs le mouvement de rotation. La construction en fut confiée à M. Breguet, dont le talent garantissait une réussite complète. Après plusieurs années de travail, M. Breguet se trouva en mesure de montrer une machine composée de rouages à dents obliques, dont le dernier axe portait un miroir d'acier de 1 centimètre de diamètre; quand on appliquait sur le premier mobile une force motrice suffisamment grande, on voyait le miroir s'animer d'un mouvement de rotation très-rapide. Il était facile d'en apprécier la vitesse et de la déduire des mouvements lents et directement observables des premiers mobiles, et de s'assurer que l'axe porteur du miroir exécutait réellement 1 500 tours par seconde. Un jour M. Breguet essaya de supprimer le miroir, et il vit que le dernier axe ainsi soulagé pouvait acquérir une vitesse de 6 à 8000 tours par seconde. On crut alors que la présence de l'air était l'obstacle qui empêchait le miroir de prendre une vitesse pareille, et l'on eut recours aux dispositions nécessaires pour faire marcher la machine dans le vide; mais, sous le récipient destiné à prévenir l'accès de l'air, la marche du miroir ne s'est pas accélérée comme on s'y attendait. C'est que la résistance provient surtout de la masse à mouvoir et de son excentricité sur l'axe de rotation; or la masse, il faut l'accepter; quant à l'excentricité, il paraît que les soins les plus minutieux apportés par le constructeur, n'ont pas suffi jusqu'ici à la rendre sensiblement nulle.

Je dois encore donner sur l'appareil de M. Arago un renseignement important, et indiquer comment on devait procéder à l'observation.

Quand on se borne à l'emploi d'un seul miroir agissant par ses



Digitized by Google

deux surfaces, ce qui est le cas le plus simple et le plus abordable, le double faisceau est toujours réfléchi, mais il l'est dans une direction quelconque, absolument indéterminée, ainsi que la position dans laquelle la lumière, en arrivant, rencontre la surface réfléchissante. Si, comme l'avait fait M. Wheatstone dans une autre circonstance, M. Arago avait cru devoir établir entre l'appareil excitateur de la lumière instantanée et l'appareil du miroir tournant, une dépendance qui ne permit aux éclats de se produire qu'au moment où le miroir occupe telle ou telle position plus ou moins bien déterminée, la direction du rayon réfléchi l'eût été également, et le champ d'observation, ainsi restreint entre certaines limites, aurait permis à un seul observateur de viser toujours utilement dans une direction connue d'avance. Mais, dans le projet de M. Arago, il n'était pas question d'établir une telle relation; l'illuminateur et le miroir tournant devaient conserver une indépendance complète, et laisser au hasard à décider de la direction des rayons réfléchis. C'est pourquoi il fallait multiplier les observateurs, et répéter l'expérience plusieurs fois par seconde, et un très-grand nombre de fois, jusqu'à ce qu'une heureuse coïncidence dirigeât les faisceaux réfléchis dans le voisinage de l'axe d'une des nombreuses lunettes braquées autour du miroir tournant et visant toutes sur lui. En employant plusieurs miroirs indépendants les uns des autres, bien des éclats se seraient produits en pure perte avant que la réflexion eût lieu réellement sur tous, et la chance favorable à l'un quelconque des observateurs diminuait avec une grande rapidité. La disposition que j'ai adoptée a surtout pour but de lever toute incertitude sur la position des rayons réfléchis; mais, avant de la décrire, je dois encore parler de l'expérience de M. Fizeau, expérience par laquelle un physicien put mesurer, pour la première fois, la vitesse de la lumière se propageant dans l'air entre deux stations choisies à la surface de la Terre.

L'appareil imaginé par M. Fizeau présente à considérer deux parties distinctes : un système de deux lunettes visant l'une sur l'autre à très-grande distance, et destinées à limiter la course des rayons lu-

Digitized by Google

mineux et à les renvoyer exactement à leur point de départ; puis un disque tournant partagé à sa circonférence, à la manière des roues dentées, en intervalles égaux, alternativement vides et pleins, et susceptible de prendre, par l'action d'un moteur, des vitesses variables à volonté.

Les deux lunettes A et B sont dirigées l'une vers l'autre, de manière que l'image de l'objectif de chacune d'elles se forme au foyer de l'autre. La lumière provenant latéralement d'une source très-vive est dirigée dans l'axe du système par une glace sans tain inclinée à 45 degrés sur cet axe et placée entre l'oculaire et le foyer de la lunette A. Tout ce qui tombe de lumière sur l'objectif de A, après avoir traversé en son foyer le lieu de l'image très-petite de l'objectif de l'autre lunette B, se dirige vers celui-ci en obéissant à la loi des foyers conjugués. En vertu de la même loi, les rayons vont ensuite concourir au foyer de la seconde lunette B, en une image qui représente, sous de très-petites dimensions, l'objectif de la première; puis cette image tombant sur un miroir normal, le faisceau qui l'a formée se réfléchit sur lui-même, traverse successivement les deux objectifs, quelle que soit leur distance, et vient, en convergeant, repasser exactement au foyer de A, son point de départ. On constate aisément leur retour : en mettant l'œil à l'oculaire, on aperçoit une image très-petite, un point lumineux semblable à une étoile.

Le temps que la lumière emploie à traverser deux fois l'appareil dans toute sa longueur, dépend évidemment de la distance des deux lunettes; et quand on rend cette distance suffisamment grande, il devient sensible et mesurable par l'emploi du disque tournant.

La position à donner au disque est définie par la condition du parallélisme de son axe de rotation avec l'axe optique commun aux deux lunettes, et par la nécessité de faire passer les dents qu'il porte à sa circonférence par le point de rencontre des rayons qui se croisent au foyer de A avant et après leur excursion dans l'appareil.

Ces conditions étant satisfaites, le disque en tournant a pour effet d'opposer et de lever périodiquement un même obstacle au passage des rayons marchant en sens inverses, les uns pour aller, les

Digitized by Google

autres pour revenir. Comme la vitesse de la lumière n'est pas infinie, comme la distance à parcourir est très-grande, les instants précis du départ et du retour d'un même rayon ne coïncident pas exactement; ils sont sensiblement postérieurs l'un à l'autre, et il est possible de donner au disque une vitesse telle, que tout rayon qui passe librement entre deux dents soit intercepté à son retour par une dent qui aura eu le temps de venir lui faire obstacle. Il est également possible de donner au disque telle autre vitesse, qui permettra à tout rayon admis entre deux dents de repasser par un autre intervalle. Mais, comme les changements de vitesse ont lieu d'une manière continue, les phénomènes aussi varient peu à peu, et traversent graduellement leurs différentes phases. Au moment où le disque commence à se mouvoir, l'observateur aperçoit au foyer de l'oculaire le point lumineux brillant au point de concours des rayons réfléchis qui reviennent vers lui; puis en prenant un mouvement de plus en plus rapide, le disque détermine un affaiblissement progressif et même une extinction complète des rayons de retour. Par des vitesses toujours croissantes, à cette première éclipse succède un second éclat, puis une seconde éclipse, et ainsi de suite, autant de fois que le permet la puissance des moyens mécaniques dont on dispose. L'observation consiste à produire, à soutenir et à mesurer, au moyen d'un compteur inhérent à la machine, la vitesse de rotation correspondante à une éclipse dont on note le numéro d'ordre. La distance des deux lunettes étant connue, donne la moitié de l'espace franchi par la lumière pendant le temps que le disque emploie à parcourir un espace angulaire mesuré pour la première éclipse, par l'arc sous-tendu par une seule dent, et mesuré pour les éclipses suivantes, par le même arc multiplié par le terme de la série naturelle des nombres impairs, correspondant au numéro d'ordre de l'éclipse observée.

M. Fizeau avait placé la lunette à oculaire dans le belvédère d'une maison située à Suresne, et la lunette à réflexion sur la hauteur de Montmartre, à une distance approximative de 8633 mètres. Le disque, portant sept cent vingt dents, était monté sur un rouage

Digitized by Google

mû par des poids; un compteur permettait d'apprécier la vitesse de rotation. La lumière était empruntée à une lampe à éther, dont la flamme, alimentée par l'oxygène, était projetée sur un fragment de chaux, de manière à y exciter une vive incandescence.

Les premiers essais tentés jusqu'à présent par cette méthode ont fourni une valeur de la vitesse de la lumière, peu différente de celle qui est admise par les astronomes. La moyenne, déduite de vingt-huit observations, donne, pour cette valeur, 70 948 lieues de 25 au degré.

Le travail de M. Fizeau date déjà de plus de trois années; il a paru sous forme d'extrait au mois de juillet 1849, dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*. Depuis cette époque jusqu'au moment où j'ai annoncé le succès de mon entreprise (30 avril 1850), on n'a rien publié, que je sache, concernant le même sujet. Si le résumé que je viens de tracer n'est pas encore complet, j'ai du moins cette confiance que les faits y sont appréciés d'une manière équitable. En rappelant parmi les astronomes les noms illustres de Roëmer et de Bradley, en citant parmi les physiciens contemporains des noms tels que ceux de MM. Wheatstone, Arago et Fizeau, auxquels est venu se joindre tout naturellement celui de l'habile mécanicien M. Breguet, je crois avoir décrit l'état où se trouvait ce rameau de la science physique au moment où j'ai commencé à m'en occuper activement, et à mettre à exécution un projet conçu depuis plusieurs années, dans le but de mesurer directement la vitesse de la lumière dans l'air et dans des milieux plus réfringents.

## MÉTHODE GÉNÉRALE POUR MESURER LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LES MILIEUX TRANSPARENTS. — VITESSES RELATIVES DE LA LUMIÈRE DANS L'AIR ET DANS L'EAU.

Le propre de la nouvelle méthode qui me reste à décrire est d'offrir le moyen d'opérer à petite distance, et d'évaluer le temps qu'emploie la lumière à franchir un intervalle de quelques mètres. Pour la définir nettement, aussi bien que pour la distinguer de celles qui ont été proposées auparavant, il suffit d'énoncer son

Digitized by Google

caractère essentiel, lequel consiste dans l'*observation de l'image fixe d'une image mobile.*

Le miroir tournant, associé à un objectif de lunette, donne aisément une image mobile d'un objet fixe; mais, ce qui n'est pas moins vrai, quoique moins évident peut-être, c'est qu'au moyen d'une réflexion sur un miroir fixe, le même système optique est très-propre à redonner une image fixe de l'image mobile.

Je vais d'abord établir ce premier point, après quoi je montrerai que le mouvement de rotation du miroir produit un déplacement de l'image fixe, *une déviation* qui donne la vitesse de la lumière dans le milieu traversé en fonction de quantités faciles à mesurer.

Le changement de milieu, toutes choses restant égales d'ailleurs, doit modifier la déviation, de manière à montrer comment la vitesse de la lumière se lie aux indices de réfraction. J'insisterai sur ce genre de comparaison, qui est le but principal de ce travail, et je ferai connaître la disposition qui permet d'opérer sur plusieurs milieux à la fois, et d'observer simultanément et comparativement les déviations correspondantes. Je compléterai ensuite la description des appareils, et j'y joindrai le détail des précautions nécessaires pour assurer le succès de l'expérience et favoriser l'exactitude des mesures.

### *Disposition générale de l'expérience.*

On place sur une même ligne horizontale : 1° une mire formée par un fil fin de platine tendu au milieu d'une petite ouverture carrée de 2 millimètres de côté, taillée dans une lame opaque; 2° le centre optique d'un objectif achromatique; et 3° le centre de figure d'un miroir plan, susceptible de tourner autour d'un axe vertical passant très-près de sa surface réfléchissante. On dirige et l'on fixe par un héliostat un faisceau de lumière solaire dans l'alignement de ces trois pièces. La mire laisse alors passer une certaine portion de lumière qui se rend sur l'objectif placé à une distance un peu moindre que le double de sa distance focale princi-

Digitized by Google

pale; réfractée par cet objectif, la lumière se réfléchit sur le miroir plan et va former dans l'espace une image amplifiée de l'ouverture et de son fil. Comme on dispose à volonté de la distance de l'objectif à la mire, on fait varier par suite arbitrairement la distance de son image au miroir, et, quand celui-ci vient à tourner, l'image se meut dans l'espace sur une circonférence dont le rayon peut prendre telle étendue qu'on voudra.

Ainsi s'obtient l'image mobile dont on peut recevoir et distinguer la trace sur un écran. Pour obtenir l'image fixe, il faut placer sur la circonférence décrite par l'image mobile, la surface réfléchissante d'un miroir sphérique concave tellement orienté, que son centre de courbure vienne coïncider avec le centre de figure du miroir tournant; quand cette condition est remplie, le faisceau tournant est réfléchi sur lui-même pendant tout le temps qu'il rencontre le miroir concave dont tous les éléments sont normaux à son axe; et, de plus, le faisceau continue à remonter l'appareil jusqu'à la mire, son point de départ, qu'il recouvre d'une image droite et de grandeur naturelle, tous les points de l'image se superposant aux points homologues de la mire elle-même.

En effet, soient $ab$, *fig.* 1, un objet, et $a'b'$ son image, formée par l'objectif L et tombant à la surface réfléchissante d'un miroir concave M; soit $c$ le point de l'espace où l'on placera plus tard le centre de figure d'un miroir tournant; si le miroir concave a son centre de courbure au point $c$, le faisceau réfléchi à sa surface ira repasser en majeure partie par l'objectif pour reformer sur l'objet $ab$ une image droite et de grandeur naturelle; car, du moment où la lumière retourne vers l'objectif, l'image $a'b'$ devient un objet dont le point $a'$ est au foyer conjugué de $a$, et le point $b'$ au foyer conjugué de $b$. Donc, toute lumière revenant de $a'$ et passant par l'objectif, doit se rendre en $a$; toute lumière revenant de $b'$ doit se rendre en $b$, et ainsi de même pour tous les autres points : donc, l'objet $ab$ est recouvert d'une image égale à lui-même et semblablement située.

Maintenant on place le miroir plan $m$ sous une obliquité quel-

conque ; et pour savoir où va se former l'image réfléchie $a''b''$, on a recours à une construction bien connue : on prolonge la trace $c\mu$ du plan du miroir et l'on détermine, pour les points $a''b''$, les positions symétriques d'un côté de ce plan avec celles qu'occupent, de l'autre côté, les points $a'b'$ ; on place alors le miroir concave en M' et on l'oriente en faisant tomber son centre de courbure au point $c$ ; le faisceau lumineux retourne alors au miroir plan, de là vers l'objectif, comme s'il provenait de $a'b'$, et il va former définitivement une image de l'objet $ab$ sur l'objet lui-même.

Cette construction donne le même résultat, pour toute obliquité du miroir plan, car la démonstration est indépendante de la valeur de l'angle d'incidence ; donc il est indifférent que l'image mobile tombe en $a''b''$ ou en $a'''b'''$, et quelle que soit sa position à la surface du miroir M', l'image, en retour, coïncide invariablement avec l'objet $ab$. Pour constater, par expérience, l'invariabilité de position de cette image, on place obliquement à l'axe de l'objectif L, entre lui et l'objet $ab$, une glace épaisse à faces parallèles dont la surface $g$ donne, par voie de réflexion partielle, une image $\alpha\beta$ facile à observer. Examinée avec un oculaire O, l'image $\alpha\beta$ garde absolument la même position, quelle que soit la direction de la partie mobile du faisceau comprise entre les deux miroirs plan et concave ; elle est donc bien réellement *l'image fixe d'une image mobile.*

Dans l'appareil qui a servi, l'objet $ab$ est la mire, *fig.* 5, telle qu'elle a été décrite ; l'objectif L a $1^m,90$ de foyer, et l'oculaire à micromètre, *fig.* 10, grossit de 10 à 20 fois ; le miroir tournant a 14 millimètres de diamètre, et le rayon de courbure du miroir concave est de 4 mètres. La distance du miroir tournant à l'objet peut varier dans des limites très-étendues, et la position de l'objectif est donnée par la nécessité de placer l'objet et la surface du miroir concave à deux de ses foyers conjugués.

Mettons actuellement le miroir en marche et faisons-le tourner d'abord lentement d'une manière continue, dans le sens indiqué par la flèche, *fig.* 1.

L'angle d'incidence variant progressivement et l'angle de réflexion

Digitized by Google

devant rester toujours égal à celui-ci, le faisceau réfléchi tourne autour du point *c*, comme le miroir, mais avec une vitesse angulaire double; l'image circule sur sa circonférence de cercle, et à chaque tour du miroir plan, elle passe une fois sur le miroir concave en faisant naître, pour l'observateur, l'image $\alpha\beta$, qui reste éteinte pendant tout le temps compris entre deux passages consécutifs. Aussi, quand le nombre des tours du miroir est inférieur à 30 par seconde, l'image ne brille-t-elle que par intermittences; par des vitesses supérieures, les apparitions se succèdent assez rapidement pour se confondre les unes avec les autres par la persistance des impressions visuelles; l'image $\alpha\beta$ semble alors permanente, et son intensité est réduite, pour l'observateur, dans le rapport de la circonférence entière à la moitié de l'arc réfléchissant du miroir concave.

Mais quand le miroir tourne suffisamment vite, un autre effet se produit, et l'on voit apparaître le phénomène important de la *déviation*. L'image $\alpha\beta$ se déplace sous le trait du micromètre oculaire et dans un sens tel, qu'on la dirait entraînée par le mouvement du miroir. Ce déplacement montre que la durée de la propagation de la lumière entre les deux miroirs n'est pas nulle, et qu'elle peut être mesurée par la grandeur de la déviation elle-même.

Pour simplifier la démonstration, réduisons la source de lumière à un point unique *a*, *fig.* 2, ne considérons que le rayon central *ac* du faisceau qui s'engage dans l'appareil, et étudions sa marche au moment où le miroir tournant se présente sous l'incidence voulue pour l'envoyer faire image en un point $a'$ sur un élément normal quelconque de la surface du miroir concave M. Réfléchi sur lui-même, ce rayon vient retrouver le miroir plan, mais déjà celui-ci a tourné, et le rayon, en s'y réfléchissant une seconde fois sous une incidence nouvelle, prend une direction nouvelle aussi, qui ne lui permet plus de former image à son point de départ, mais qui l'oblige à donner en $a_1$ une image déviée dans le sens du mouvement de rotation, et, par suite, une image $\alpha'$ également déviée pour l'observateur.

Il est facile de voir comment la grandeur de cette déviation est liée



Digitized by Google

à la vitesse de la lumière, au nombre de tours du miroir dans l'unité de temps et aux distances qui séparent les différentes pièces de l'appareil.

Désignons par $r$ la distance $oa$ du centre optique de l'objectif à la mire, par $l$ et $l'$ les distances du miroir tournant au miroir fixe et au même centre optique $o$; nommons $n$ le nombre de tours du miroir par seconde, $\pi$ le rapport de la circonférence au diamètre, et V la vitesse de la lumière ou l'espace qu'elle parcourt en une seconde; appelons $d$ l'arc de déviation $aa_1$ égal à $\alpha\alpha'$, et prenons $\omega$ pour désigner l'angle dont le miroir a tourné pendant le temps qu'emploie la lumière pour aller et venir entre les deux miroirs.

Afin d'avoir l'angle de déviation $\delta$ exactement double de l'angle $\omega$, je commencerai par négliger la distance $l'$, c'est-à-dire par supposer l'objectif placé à une distance insensible du miroir tournant. Dans cette hypothèse, si l'on imprime au miroir une vitesse de $n$ tours par seconde, la déviation $d$ que l'on observe fera connaître l'angle $\omega = \frac{\delta}{2}$, dont tourne le miroir pendant que la lumière franchit la distance $2l$. Le rapport de l'angle $\omega$ à $n$ fois quatre angles droits, ou le rapport de la déviation $d$ à $2n$ fois la circonférence entière $2\pi r$, est alors égal au rapport de la distance $2l$ à celle que franchit la lumière en une seconde, ou égal à $\frac{2l}{V}$, ce qui donne

$$d = \frac{8\pi\, lnr}{V}.$$

Mais, en réalité, l'objectif ne se confond jamais avec le miroir tournant, et même l'expérience exige qu'on établisse entre eux une distance telle, que la déviation en est notablement diminuée. La correction qu'il faut faire subir à la valeur ci-dessus ressort clairement de la construction représentée dans la *fig*. 2.

On prolonge les traces $c\mu$, $c\mu'$ du plan du miroir tournant dans les deux positions qu'il occupe aux instants précis qui limitent la durée d'une excursion de la lumière vers le miroir concave, et l'on

Digitized by Google

construit, relativement à ces traces, les points $a''$ et $a'''$ symétriques du point $a'$. L'angle $a''ca'''$ est bien alors égal à $2\omega$, et serait égal aussi à l'angle de déviation, si l'objectif avait son centre appliqué en $c$; mais comme, en réalité, cette condition ne peut être remplie, et comme l'objectif est toujours placé à une certaine distance $l'$ du miroir, l'angle de déviation égal à l'angle opposé $a''oa'''$ est moindre que $a''ca'''$ égal à $2\omega$. Ces angles étant très-petits et aux sommets de deux triangles qui ont même base $a''a'''$, donnent sensiblement, avec leurs hauteurs $l$ et $l+l'$, la proportion

$$\delta : 2\omega :: l : l+l';$$

d'où il suit qu'au lieu d'avoir simplement

$$\delta = 2\omega, \quad \text{on a} \quad \delta = 2\omega \times \frac{l}{l+l'}.$$

En conséquence, il vient pour la véritable valeur de la déviation,

$$d = \frac{8\pi l^2 nr}{V(l+l')},$$

et, pour la vitesse de la lumière,

$$V = \frac{8\pi l^2 nr}{\delta(l+l')}.$$

Cette formule peut servir en effet à calculer la vitesse de la lumière dans l'air avec une approximation qui dépend de la précision avec laquelle on mesure la déviation, ainsi que les diverses quantités représentées par les lettres $l$, $l'$, $r$ et $n$.

On arrive à la même expression en raisonnant de cette autre manière : la vitesse de la lumière est l'espace qu'elle parcourt dans l'unité de temps

$$V = \frac{e}{t};$$

or

$$e = 2l, \quad t = \frac{\delta(l+l')}{4\pi lnr};$$

remplaçant $e$ et $t$ par leurs valeurs, on trouve, comme précé-

Digitized by Google

demment,

$$V = \frac{8\pi l^2 nr}{\delta(l+l')}.$$

La même méthode s'applique à la mesure de la vitesse de la lumière dans tout milieu homogène et transparent que l'on placerait entre le miroir tournant et le miroir concave. Le milieu seul venant à changer sur toute la longueur de ce trajet, la déviation varierait dans le simple rapport des vitesses de la lumière dans le nouveau et dans l'ancien milieu. Si, par exemple, on remplit d'eau l'espace compris entre les deux miroirs, sans rien changer du reste, l'indice de réfraction de l'eau étant sensiblement égal à $\frac{4}{3}$, la déviation doit augmenter dans le rapport de 3 à 4, pour confirmer la théorie des ondulations, ou diminuer dans le rapport de 4 à 3 pour justifier le système de l'émission.

Mais quand on interpose une colonne d'eau comprise entre deux plans parallèles, on est obligé de laisser entre ces deux plans et chacun des miroirs une certaine distance; alors la distance $l$ se trouve partagée en deux parties, l'une P occupée par le milieu réfringent, et l'autre Q où l'air persiste. En pareil cas, la déviation observée donne seulement la vitesse moyenne U de la lumière dans un espace occupé en partie par l'air et en partie par l'eau. Mais comme la vitesse V dans l'air est déjà connue, comme la vitesse moyenne U s'obtient de la même manière, comme on peut mesurer directement les longueurs P et Q, dont la somme est égale à $l$, on obtient facilement la vitesse V' de la lumière dans l'eau. En effet, la vitesse moyenne de la lumière dans le trajet P + Q est

$$U = \frac{(P+Q)VV'}{PV+QV'};$$

d'où l'on tire

$$V' = \frac{PVU}{(P+Q)V - QU}.$$

Au reste, pour trancher la question, qui intéresse à un si haut point la théorie, il n'est pas nécessaire de mesurer la vitesse de la lumière

Digitized by Google

dans l'eau, ni de se préoccuper des moyens d'y parvenir; il suffit de constater dans quel sens la déviation qui se produit en opérant uniquement dans l'air, se modifie quand on interpose une colonne d'eau assez longue pour produire un effet sensible; mieux vaut encore disposer dans l'appareil deux lignes d'expériences, l'une pour l'air seul, l'autre pour l'air et l'eau, et observer simultanément les deux déviations correspondantes. La comparaison en devient alors tellement facile, qu'il est inutile de procéder à aucune mesure : on dispose les choses comme elles sont représentées dans la figure 3.

J'éviterai encore de compliquer le tracé géométrique de l'expérience, en réduisant, comme précédemment, le faisceau de lumière à son rayon central; il est bien entendu que son point de départ, marqué en $a$, est toujours la mire, *fig.* 5, formée par une ouverture carrée, traversée en son milieu par un fil vertical, et dont l'image vue à l'oculaire offre l'aspect représenté *fig.* 6.

A droite et à gauche du faisceau direct, et sur la trajectoire de l'image mobile, on place deux miroirs concaves M et M', dont les surfaces appartiennent à la même sphère ayant son centre en $c$. Chacun d'eux limite une distance, une ligne d'expérience qui s'étend de sa surface à celle du miroir tournant.

Le rayon mobile trouve alors à se réfléchir à chaque tour dans deux directions différentes, et quand il tombe sur M, et quand il tombe sur M'; par suite, le nombre des apparitions de l'image $\alpha$ se trouve doublé; autrement dit, cette image est en réalité produite par la superposition des impressions de deux images, l'une due au passage de la lumière suivant la ligne $c$M, l'autre due à son passage suivant $c$M'. Tant que les longueurs $c$M et $c$M' sont maintenues égales, tant que les milieux, traversés de part et d'autre, restent identiques, l'accélération du mouvement de rotation, produisant sur les deux images une même déviation, ne saurait les rendre distinctes l'une de l'autre. Mais l'interposition d'un milieu réfringent sur l'une des deux directions $c$M ou $c$M', altérant la symétrie parfaite du système, doit, en modifiant la vitesse de la lumière dans l'une des deux voies, produire le dédoublement $\alpha'\alpha''$ de l'image $\alpha$. C'est, en effet, ce qui

Digitized by Google

arrive lorsque, au devant du miroir M′ on place le tuyau T rempli d'eau et terminé, à ses deux extrémités, par des glaces parallèles. Seulement, pour assurer le succès de l'expérience et en rendre le résultat plus apparent et plus rigoureux, il est nécessaire de prendre encore certaines précautions.

L'interposition du tube à eau apporte dans la marche des rayons un trouble dont il est facile de se rendre compte en considérant que la face d'entrée T agit sur le faisceau convergent, de manière à rapprocher de la normale tous les rayons, et à produire un allongement de foyer. Si, en l'absence du tube, l'image mobile vient tomber exactement sur la surface réfléchissante M′, le tube étant remis en place, on observe que l'image paraît trouble à l'oculaire parce qu'elle tend à se former au delà du miroir concave.

Pour rétablir le degré de convergence nécessaire à la netteté de l'image en M′, on place en avant du tube une lentille simple L′ d'une très-grande longueur focale, facile à déterminer par le tâtonnement ou par le calcul. Cela fait, l'image en retour présente la même netteté, soit qu'elle revienne par l'un ou l'autre chemin ; elle ne varie plus que par la couleur et l'intensité : blanche et vive, quand la lumière a constamment cheminé dans l'air, elle devient verte et sombre par l'interposition de la colonne d'eau, et si l'on n'avait recours à un artifice particulier, cette différence d'éclat ne permettrait pas de voir le dédoublement qui doit survenir avec la déviation.

Appelant *image dans l'air* la superposition des impressions produites par les réapparitions rapides de l'image formée après le parcours complet de la lumière dans l'air, et appelant *image dans l'eau* la superposition des impressions de la lumière dirigée dans l'autre voie, je vais montrer comment on les rend distinctes l'une de l'autre dans toutes les phases de l'expérience.

Faisons tourner le miroir à raison de plus de trente tours par seconde, afin d'avoir, en mettant l'œil à l'oculaire, une impression continue. Si l'on masque le miroir M′, on ne voit que l'image dans l'air ; si, au contraire, l'on transporte l'obstacle au devant du miroir M, on ne voit que l'image dans l'eau, et pour que l'une ou

Digitized by Google

l'autre soit entièrement visible, *fig*. 6, il faut que le miroir concave, soit le miroir M', *fig*. 4, reste découvert dans toute la hauteur de la trace *h* de l'image mobile à sa surface. Veut-on réduire la hauteur de l'image perçue, on n'a qu'à placer comme en M, *fig*. 4, au devant du miroir concave, un écran percé d'une fente dont la hauteur soit moindre que celle de la trace *h*; nécessairement l'image perçue se réduit d'autant, et prend l'aspect représenté *fig*. 7.

Couvrons donc le miroir M de son écran fendu, dégageons complétement le miroir M', faisons tourner le miroir mobile assez vite pour confondre les impressions sans donner encore de déviation sensible; il est évident que l'image perçue sera formée de la superposition de l'image dans l'eau conservant toute sa hauteur, son intensité et sa couleur propre, et de l'image dans l'air, plus vive et plus basse, traversées toutes deux par le même trait vertical et rectiligne : $\alpha$ sera une image résultante, telle que celle représentée *fig*. 8.

Pour compléter l'appareil, il ne reste plus qu'à placer au foyer de l'oculaire un verre plan marqué d'un trait vertical qui, pour une rotation lente ou même nulle du miroir tournant, se confonde avec le trait médian, image du fil de la mire. Alors on peut lancer le miroir à toute vitesse, et à mesure que sa rotation s'accélère, on voit l'image se transporter en masse et se disloquer, ainsi que dans la figure 9; le trait fixe appartenant à l'oculaire, reste là comme point de repère très-propre à faire juger des grandeurs absolues et relatives des deux déviations.

En fait, la déviation de l'image médiane est toujours *moindre* que celle des portions visibles de l'image verte, qui la dépasse en haut et en bas. Si, par exemple, on adopte pour l'expérience les données suivantes :

| | |
|---|---|
| $r = 3^{m}$ | $n = 500$ |
| $l = 4^{m}$ | $P = 3^{m}$ |
| $l' = 1^{m},18$ | $Q = 1^{m}$ |

on a pour l'image blanche une déviation de $0^{mm},375$, et pour l'image



Digitized by Google

verte une déviation de $0^{mm},469$; leur différence ne peut évidemment pas échapper à l'observation.

Mais l'image blanche, c'est l'image dans l'air, et sa déviation donne la mesure de la durée du séjour de la lumière entre les deux miroirs; l'image verte, c'est l'image dans l'eau, et sa déviation donne aussi la mesure du temps correspondant à une même distance parcourue. Nous arrivons donc à cette conclusion définitive et à tout jamais inconciliable avec le système de l'émission :

*La lumière se meut plus vite dans l'air que dans l'eau.*

### *Description des appareils. — Détails pratiques sur la mise en expérience.*

Quand j'ai résolu d'aborder cette opération délicate, mon premier soin a été de me procurer un moteur spécial pour communiquer au miroir un mouvement de rotation rapide et persévérant. M. Wheatstone, l'inventeur du miroir tournant, employait une machine qui agissait comme une sorte de rouet au moyen d'un cordon embrassant les circonférences inégales d'une roue motrice et d'une petite poulie solidaire avec l'axe du miroir; il obtenait ainsi une vitesse de 6 à 800 tours par seconde. M. Breguet, chargé par M. Arago de réaliser une vitesse plus grande encore, a construit la machine déjà citée qui a paru à l'Exposition des produits de l'industrie pour l'année 1844. L'application de l'engrenage de White aux derniers mobiles, et l'extrême légèreté du miroir, permirent d'atteindre des vitesses de 1 000 à 1 500 tours par seconde. Au moment de choisir entre les deux systèmes, j'ai redouté les effets destructeurs de ces divers modes de communication de mouvement; j'ai craint de ne pas pouvoir modifier à volonté la vitesse suivant le besoin, et la maintenir constante pendant un temps suffisamment long. J'ai pensé, au contraire, obtenir vitesse, solidité et régularité de marche en adoptant une petite machine qui utilise l'écoulement des gaz par les orifices étroits.

Digitized by Google

Cette machine consiste en une petite turbine à vapeur, *fig.* 11, assez comparable à la sirène, mais qui donne comparativement peu de son. Le même axe, sur lequel est fixée la couronne des palettes exposées à l'action du fluide, porte aussi le miroir, ce qui réduit toute la partie mobile de l'appareil à une pièce unique sur laquelle ont dû se concentrer tous les soins du constructeur, sur laquelle doit porter également toute la surveillance de l'expérimentateur. En jetant les yeux sur la figure, on saisit au premier coup d'œil la disposition générale de la machine.

Au milieu se trouve une sorte de chambre qui communique avec le générateur de vapeur. Cette chambre, représentée en détail *fig.* 12 et 13, est échancrée de manière à permettre d'ôter et de remettre l'axe à sa place sans démonter les annexes qu'il porte; elle repose, *fig.* 11, sur deux colonnes réunies inférieurement par une traverse; une arcade la surmonte dans le but d'offrir avec la traverse inférieure les deux points d'appui qui déterminent la position de l'axe du mobile. Cet axe est terminé en pointe à ses extrémités qui s'engagent dans des empreintes coniques, pratiquées au bout des vis d'acier maintenues par des contre-écrous, l'une au sommet de l'arcade, l'autre au milieu de la traverse; ces vis sont d'ailleurs traversées d'outre en outre par un canal étroit, creusé pour le passage de l'huile déposée dans les petits réservoirs qui les terminent en haut et en bas.

Le réservoir supérieur fonctionne de la manière la plus simple : un tube de caoutchouc lui communique, par l'intermédiaire de l'air contenu dans un flacon, la pression d'une colonne de mercure de 15 à 20 centimètres. Sous l'influence de cette pression, l'huile pénètre dans le canal de la vis et vient suinter à l'extrémité supérieure de l'axe. Le réservoir inférieur supporte aussi une égale pression; mais comme il s'agit de faire monter l'huile au-dessus de son niveau, la vis se prolonge par un tube plongeant qui pénètre jusqu'au fond d'un godet intérieur dont les parois n'étant pas rigoureusement en contact avec celles du réservoir, laissent la pression se transmettre librement par l'air à la surface de l'huile. Par ce moyen,



Digitized by Google

les deux extrémités de l'axe du mobile sont incessamment et abondamment lubrifiées.

Si maintenant on examine le mobile lui-même, on voit que son axe porte trois appendices différents : l'un situé au-dessus et les deux autres au-dessous de la chambre à vapeur.

Le premier seulement a la forme circulaire, *fig.* 14, c'est un disque analogue à celui de la sirène et percé d'une rangée de vingt-quatre trous situés à égales distances du centre ; les cloisons qui les séparent sont planes, minces et inclinées de manière à recevoir le choc du fluide élastique et à fonctionner comme aubes de la turbine. La vapeur s'échappe de la chambre placée au-dessous, *fig.* 13, par deux orifices pratiqués aux extrémités d'un même diamètre dans l'épaisseur de la paroi et percés obliquement en sens inverse de l'inclinaison des palettes du disque tournant. Comme ce disque est placé très-près de la paroi sous-jacente, le fluide qui s'écoule des orifices fixes est obligé de changer de direction et produit une réaction qui sollicite successivement toutes les aubes à circuler dans le même sens, autour de leur centre commun.

Il eût été plus conforme à la théorie d'employer des aubes courbes ; mais j'en ai été détourné par les difficultés qu'on aurait rencontrées pour les construire avec toute la régularité désirable ; d'ailleurs il ne s'agit pas, en pareille circonstance, de réaliser un effet utile, mais bien d'obtenir une certaine vitesse. Or, comme la force motrice est à discrétion, on arrive facilement, avec des aubes plates, à réaliser les vitesses que comportent la délicatesse des pivots et la résistance de la matière au développement excessif de la force centrifuge. En laissant écouler la vapeur sous une pression d'une demi-atmosphère seulement, on fait prendre au mobile une vitesse de 6 à 800 tours ; le calcul et la manifestation de certains phénomènes s'accordent à montrer qu'il ne serait pas prudent d'aller beaucoup au delà. Quand on compare ce résultat à celui qu'a obtenu M. Breguet, il semble que la turbine à vapeur reste en arrière de la machine à roues dentées ; mais si l'on compare les dimensions des miroirs entraînés dans les deux cas, on trouve que l'avantage est encore à la nouvelle ma-

Digitized by Google

chine : pour l'observation, il vaut mieux faire 800 tours avec un miroir de 14 millimètres, que 1200 avec un miroir de 10 millimètres de diamètre.

Dans sa partie inférieure, *fig.* 11, l'axe est interrompu par un anneau dans lequel on enchâsse un ou deux miroirs placés dos à dos; des viroles à vis les maintiennent en place, en exerçant une pression modérée; les miroirs sont en verre, taillés dans une même glace parallèle et argentés sur les faces qui ont appartenu au même côté de la glace. L'étamage au mercure ne résiste pas à une rotation de plus de 200 tours par seconde, même après s'être consolidé par le temps et après être demeuré deux ou trois années en repos. La partie réfléchissante de l'amalgame qui reste toujours liquide, chassée par la force centrifuge, se réfugie vers les bords, s'écoule dans la monture, et l'on voit apparaître au milieu du miroir une bande mate, qui s'étend de proche en proche, et finit par envahir la surface tout entière : voilà pourquoi il a fallu recourir à l'étamage solide à l'argent tel qu'on commence à l'appliquer régulièrement dans le commerce.

Entre l'anneau récepteur des miroirs et la chambre à vapeur, l'axe reparaît dans une étendue suffisante pour recevoir un dernier annexe de forme triangulaire, et muni de trois vis susceptibles de se déplacer dans le sens vertical. Cet organe est destiné à rétablir après coup, par la distribution de sa masse, la coïncidence de l'axe d'inertie du système tournant, avec son axe de figure. En cela il joue un rôle très-important. Quelque soin qu'on apporte dans la construction pour rendre le mobile parfaitement symétrique, l'hétérogénéité de la matière ne permet pas de faire passer d'emblée l'axe d'inertie par les pointes qui déterminent l'axe de rotation. L'appareil vibre en tournant; il se produit un son dont l'intensité menace les pivots d'une prompte destruction. L'adjonction du *compensateur d'inertie* permet de remédier à cet inconvénient redoutable. Un coup de lime, appliqué méthodiquement sur un ou deux des trois sommets du triangle, ramène d'abord le centre de gravité du système sur l'axe de figure, qui déjà croise ainsi l'axe d'inertie. Pour redresser

Digitized by Google

ce dernier et le faire coïncider avec l'autre, il n'y a plus qu'à déplacer convenablement deux des vis du compensateur (1).

Quelque soin que l'on prenne pour opérer cette rectification, on ne réussit jamais à annuler complétement les vibrations sonores qui se développent sur les pivots; car, lors même qu'on arriverait à distribuer la masse de manière à équilibrer le système ainsi qu'à annuler le couple résultant des forces centrifuges, les pivots n'étant pas

---

(1) Voici comment on procède à ces deux rectifications : On retire le mobile et on le place horizontalement en le faisant reposer par ses extrémités sur deux glaces inclinées suivant un angle moindre que celui des deux génératrices des cônes terminaux. Dans cette situation, le mobile tourne avec une extrême facilité; et si son centre de gravité n'est pas exactement sur la ligne des pointes, il oscille autour d'une position d'équilibre avec une vitesse qui donne la notion du sens et de la grandeur de la correction à faire; on use alors à la lime ceux des sommets du compensateur qui, dans la position d'équilibre, se placent au-dessous du plan horizontal, mené par l'axe du corps : peu à peu on arrive à rendre l'équilibre indifférent, et dès lors les axes de figure et d'inertie se coupent au centre de gravité du système.

Il se peut néanmoins qu'ils fassent encore un certain angle entre eux : on en est averti par la persistance du son d'axe et des vibrations qui l'accompagnent lorsque, le mobile étant remis en place, on vient à faire fonctionner la machine. Il faut alors procéder à une seconde rectification beaucoup plus délicate encore que la première; pour cela on s'en prend aux vis à régler, que je désignerai par les numéros d'ordre 1, 2, 3. On surcharge d'abord la vis n° 1 de quelques centigrammes de cire à l'une de ses extrémités, et l'on en fait autant sur le milieu du côté opposé du compensateur. Le centre de gravité ne change pas de position ; cependant, quand on met la machine en action, il peut arriver que les vibrations soient devenues moins ou plus intenses, ou bien qu'il ne soit survenu aucun changement appréciable. Dans le premier cas, il faut agir sur la vis n° 1 dans le sens de la surcharge ou en sens opposé; dans le cas contraire, il faut la laisser en place et agir sur les vis 2 et 3. On tâte alors dans quel sens il faut les déplacer, en les surchargeant simultanément, en sens inverse, de petites masses égales, que l'on équilibre par deux masses semblables placées aux deux bouts de la vis n° 1, et l'on agit peu à peu en les déplaçant dans le sens indiqué jusqu'à ce qu'on n'obtienne plus d'amélioration sensible; puis on revient à la vis n° 1, et ainsi de suite, de manière à atténuer, autant que possible, le son d'axe, par cette méthode d'approximations successives.

Digitized by Google

rigoureusement de révolution, produiraient encore des chocs ou des pressions périodiques qui suffisent pour engendrer un son ; mais on réussit au moins à placer la machine dans de telles conditions, qu'elle peut marcher des heures entières sans détérioration appréciable ; ce qui est le point essentiel, et constitue la solution pratique des difficultés qui s'opposaient à l'emploi régulier du miroir tournant.

Quant à la dureté qu'il faut communiquer aux extrémités de l'axe et des vis d'acier qui le maintiennent en place, pour ralentir l'usure aux points de contact, je m'en suis complétement remis aux soins et à l'expérience consommée de M. Froment, notre habile artiste français, qui m'a si puissamment secondé, et dont le nom rappelle déjà de si nombreux et si parfaits ouvrages.

A côté de la petite turbine représentée conformément à la description que je viens d'en donner, on voit, dans la figure 11, les deux flacons destinés à régler l'alimentation d'huile ; remplis d'air, ils communiquent chacun avec l'un des réservoirs précédemment décrits. Quand on veut développer la pression, on verse du mercure dans le tube vertical qui plonge au fond de chacun des flacons. L'air se comprime et exerce une pression mesurée par la hauteur de colonne soutenue à l'intérieur du tube. En vertu de la parfaite adaptation des cônes terminaux dans leurs creux respectifs, l'huile est gardée sous une pression de 15 à 20 centimètres, et ne suinte que très-lentement quand la machine fonctionne.

Le générateur chargé de fournir un écoulement constant de fluide élastique est une simple chaudière semblable à celles qui, dans les cabinets de physique, sont annexées aux petits modèles de la machine de Watt. Je ne m'arrêterai donc pas à la décrire. Je dirai seulement que sa capacité est de 25 litres, qu'elle est pourvue d'un manomètre, d'une soupape, d'un tube jaugeur du niveau, et d'un ajutage à robinet pour régler la dépense de la vapeur et sa vitesse d'écoulement. Le tube de communication qui se rend à la turbine a dû être garni de plusieurs épaisseurs de lisières pour diminuer la

Digitized by Google

perte de chaleur par rayonnement, et réduire autant que possible la condensation qui en résulte.

Malgré cette précaution, la vapeur arrivait au petit moteur tellement chargée de liquide, qu'il a fallu la surchauffer avec une forte lampe à esprit-de-vin avant son admission dans la turbine. La pièce destinée à cette opération, ou le *surchauffeur*, est un tube en métal aplati, tel qu'on le voit dans la figure, et qui porte un robinet à trois fins pour la mise en train. Dans sa position normale, ce robinet permet la libre communication de la chaudière à la turbine; mais en agissant sur la clef dans un sens ou dans l'autre, on suspend l'écoulement, ou l'on dirige la vapeur à l'extérieur par un tube additionnel sans la laisser passer à travers la machine. C'est ainsi qu'on rejette au dehors l'eau qui se condense au moment de la mise en train dans l'intérieur du tube de communication. Dès que l'eau cesse d'être entraînée en quantité notable, on remet le robinet à trois fins dans sa position normale; aussitôt la vapeur se dirige à travers le surchauffeur et va agir sur la turbine comme un gaz véritable. Quand l'écoulement est ainsi établi, on en règle la vitesse au moyen du robinet ordinaire qui tient à la chaudière et qui s'ajuste au tube de communication. Afin d'agir sur la clef de ce robinet, du lieu même où l'on observe, on se sert d'un cordon enroulé sur un petit treuil placé à la portée de la main.

Il va sans dire que, pour conserver la netteté des images, le miroir tournant doit être abrité par des écrans convenablement disposés, contre les rejaillissements de la vapeur et de l'huile, et contre l'interposition des courants d'air échauffés.

Il importe également de conserver à la colonne d'eau qui fait partie de l'appareil, toute sa transparence et son homogénéité. Placée dans un tube de zinc entre des glaces parallèles, cette eau se présente aux rayons qui vont et viennent, sous une épaisseur de 3 mètres; c'est en réalité comme si l'on opérait sur une épaisseur double. Or, il est évident que par une épaisseur de 6 mètres, la coloration la plus faible ajoutée à celle du milieu, ou la suspension des particules les plus rares, produirait bientôt une extinction complète

Digitized by Google

des rayons qui s'y propagent, de même que les plus petites variations de densité troubleraient leur marche, au point de compromettre les observations. J'ai reconnu que l'eau commune qui a passé par le filtre des fontaines ordinaires, présente toute la limpidité désirable, et même une transparence bien supérieure à celle de l'eau distillée, dans laquelle flottent toujours des matières organiques qui se reproduisent sans cesse; mais pour que cette eau restât claire, pour éviter qu'elle se chargeât de flocons d'oxyde de zinc, il a fallu recouvrir le métal d'une forte couche de vernis. Puis, en ayant soin de ne pas remplir le tube, on se réserve la facilité de rétablir, par l'agitation, l'homogénéité du milieu, malgré les variations inévitables de la température ambiante. Enfin il peut arriver que, malgré toutes ces précautions, l'image à l'oculaire soit encore trouble et difforme; c'est qu'alors les glaces qui terminent la colonne d'eau sont forcées dans leurs montures; il faut en pareil cas leur donner du jeu dans les sertissures et recourir simplement à la cire pour prévenir l'écoulement du liquide sans exercer de pressions inégales.

Jusqu'ici, rien ne laisse supposer que je me sois préoccupé des moyens de mesurer la vitesse de rotation du miroir; c'est qu'en effet, tant qu'il ne s'agit que d'apprécier les vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau, la détermination du mouvement angulaire du miroir n'offre qu'un intérêt secondaire. Cependant, ne fût-ce que pour connaître la puissance du moteur que j'avais adopté, j'ai mis à profit le son que donne l'axe en tournant avec rapidité, pour le comparer à celui d'un diapason étalonné, et pour déduire approximativement de l'intervalle musical de ces deux sons, le nombre de tours du mobile sur lui-même; j'ai ainsi reconnu que la petite turbine à vapeur acquiert facilement, par une pression de $\frac{1}{2}$ atmosphère, une vitesse de 6 à 800 tours par seconde. Mais déjà, par une vitesse de 512 tours, qui donne l'unisson de l'*ut*$_4$, la question est jugée; la déviation a lieu simultanément pour les deux images, et la déviation de l'image dans l'eau est manifestement plus grande que celle de l'image dans l'air. De plus, en tenant compte des lon-



Digitized by Google

gueurs d'air et d'eau traversées, les déviations se montrent sensiblement proportionnelles aux indices de réfraction.

*Résumé. — Conclusion.*

Depuis nombre d'années, deux systèmes rivaux prétendent à l'explication des phénomènes lumineux. Parmi ces phénomènes, l'un des plus simples et des plus apparents, la réfraction, résulte de deux actions opposées de la part des corps, suivant qu'on cherche à l'interpréter dans l'une ou dans l'autre théorie. D'après le système de l'émission, le changement de direction de la lumière serait dû à une accélération subie à son entrée dans les milieux réfringents. Dans le système des ondulations, ce même changement de direction devrait coïncider avec un ralentissement dans la vitesse de propagation du principe lumineux.

Frappé de cet antagonisme entre les deux systèmes, M. Arago déclare, en 1838, que l'un des deux succombera le jour où l'on constatera, par une expérience directe, dans quel sens se modifie la vitesse, lorsque la lumière pénètre d'un milieu rare dans un milieu plus dense, lorsqu'elle passe de l'air dans l'eau ou dans tout autre liquide; en même temps il annonce que le miroir tournant, récemment inventé par M. Wheatstone, servira à réaliser une pareille entreprise.

Douze années s'écoulent sans qu'on puisse saisir au retour le rayon fugitif réfléchi par le miroir tournant. C'est alors qu'en lui associant un miroir concave, je reconnais que le miroir tournant peut donner à l'observateur l'image fixe d'une image mobile; image fixe pour une rotation uniforme, mais qui se dévie en raison directe de la vitesse angulaire du miroir et de la durée du double parcours de la lumière entre deux stations très-rapprochées. Un calcul très-simple montre que l'on obtient ainsi un signe sensible et mesurable de la durée de la propagation du principe lumineux entre deux points distants d'un petit nombre de mètres. Dès lors il devient possible d'interposer aussi bien ou de l'air ou de

Digitized by Google

l'eau, et de juger des vitesses relatives par les déviations correspondantes. Un artifice expérimental permet, en outre, d'obtenir simultanément les deux déviations, de les superposer dans le champ d'un même instrument, et d'en opérer la comparaison directe sans les rapporter à une unité commune, sans qu'il soit besoin de prendre aucune mesure.

Que l'on modifie la vitesse du miroir ou la distance des stations ou celle des différentes pièces de l'appareil, les déviations changent de grandeur sans doute; mais toujours celle qui correspond au trajet dans l'eau se montre plus grande que l'autre, toujours la lumière se trouve retardée dans son passage à travers le milieu le plus réfringent.

La conclusion dernière de ce travail consiste donc à déclarer le système de l'émission *incompatible* avec la réalité des faits.

*Vu et approuvé,*

Le 12 Avril 1853,

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

MILNE EDWARDS.

*Permis d'imprimer,*

Pour le Recteur en congé,

*L'Inspecteur délégué,*

CHARPENTIER.

Digitized by Google

# PROPOSITIONS DE CHIMIE

## DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

1°. Équivalents chimiques. — Atomes. Comment on les détermine ; ce qui distingue les atomes des équivalents.

2°. Équivalents thermiques. — Comment on les détermine. Quel parti on en tire pour la classification des corps.

3°. Équivalents cristallographiques ; — Isomorphisme. — Comment on emploie ces équivalents pour la classification des corps.

4°. Équivalents électriques. — Comment on les détermine.

5°. Affinité. — Cohésion. — Ressemblances et différences qui existent entre ces deux forces.

6°. Dimorphisme. Polymorphisme. Comment on constate son existence dans les corps.

7°. Chaleur développée par les réactions chimiques. — Rapports qui lient les développements de chaleur au développement d'électricité qui a lieu pendant l'action chimique et à la cause même de l'affinité chimique.

*Vu et approuvé,*

Le 12 Avril 1853,

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

MILNE EDWARDS.

*Permis d'imprimer,*

Pour le Recteur en congé,

*L'Inspecteur délégué,*

CHARPENTIER.

PARIS — IMPRIMERIE DE BACHELIER, RUE DU JARDINET, N° 12.

Digitized by Google

Fig. 2.

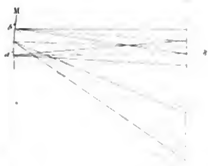










Fig. 14.



Fig. 13.

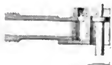


Fig. 12.



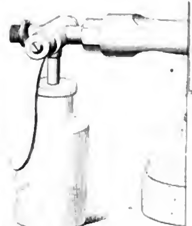


Fig. 6.

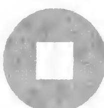


Fig. 7.



Fig. 8.

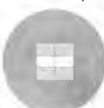
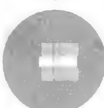


Fig. 9.



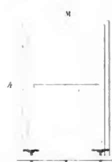
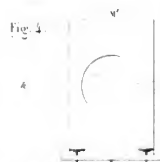


Fig. 4.



*...ud. imp. r. des Noyers, 63 Paris*

*Dulos ...*

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

PARIS. — IMPRIMERIE DE BACHELIER,
RUE DU JARDINET, 12.

Digitized by Google

JOHN G. WOLBACH LIBRARY
HARVARD COLLEGE OBSERVATORY
60 GARDEN STREET
CAMBRIDGE, MASS. 02138

**DATE DUE**

| | |
|---|---|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

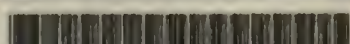
GAYLORD PRINTED IN U.S.A.

Digitized by Google




JOHN G. WOLBACH LIBRARY
HARVARD COLLEGE OBSERVATORY
60 GARDEN STREET
CAMBRIDGE, MASS. 02138

Digitized by Google


3 2044 078 774 072

Digitized by Google